Ferdowsi Civil Engineering, 38, 2, 2025. (31-48)

Ferdowsi University of Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

Effect of Alkaline Activator on Static and Dynamic Properties of Geopolymer Mortars Containing Ferrock and Fibers

Research Article

Amir Hosein Varasteh Siah Estalakhi [1], Seyed Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad[2]

DOI: 10.22067/jfcei.2025.88923.1312

1- Introduction

Cement is one of the most widely used construction materials globally, yet its production significantly contributes to CO_2 emissions and environmental pollution. In response to these challenges, researchers are exploring alternative materials such as geopolymers, which exhibit high durability, lower CO_2 emissions, and enhanced mechanical properties. Among these alternatives, Ferrock, an iron-based compound made from industrial by-products, has emerged as a sustainable substitute due to its ability to sequester CO_2 while offering superior strength and durability. Additionally, incorporating polypropylene fibers into mortar mixtures can improve tensile strength, impact resistance, and durability.

Geopolymers rely on aluminosilicate precursors that react with alkaline solutions to form a robust and chemically stable matrix. Ferrock, when combined with geopolymer technology, has the potential to create high-performance, environmentally friendly construction materials. Despite its promising characteristics, limited studies exist on the behavior of geopolymer mortars activated with alkaline solutions and reinforced with Ferrock and fibers. This study investigates the influence of alkaline activators on the static and dynamic properties of geopolymer mortars containing Ferrock and polypropylene fibers, aiming to enhance both mechanical properties and sustainability in construction applications.

2- Materials and Experimental Program

The primary materials used in this study included ground granulated blast furnace slag (GGBFS) as the base binder, Ferrock as a supplementary material, sodium silicate and sodium hydroxide as alkaline activators, and polypropylene fibers as reinforcement. Fine silica sand was used as aggregate, and potable water was used for mixing. Sodium hydroxide (NaOH) flakes with 98% purity were dissolved in water to prepare the alkaline solution. The chemical composition of Ferrock included iron-based industrial waste combined with reactive binders, which contributed to its strength and durability. The polypropylene fibers were 6 mm in length and were added in different volume fractions to evaluate their impact on mechanical properties.

The experimental work was conducted in three phases. The first phase involved preparing control mixtures with different liquid-to-binder ratios (0.4 and 0.5) and sodium silicate-to-sodium hydroxide ratios (1.5 and 2). In the second phase, Ferrock replaced slag at 5%, 8%, 12%, and 15% weight fractions. The third phase introduced polypropylene fibers at 0.1%, 0.2%, 0.3%, and 0.5% by volume. The mechanical and durability properties of the samples were evaluated through compressive and flexural strength tests, ultrasonic pulse velocity, electrical resistivity, impact resistance, and water absorption tests. The samples were subjected to both water and ambient curing conditions.

The mixing process was carefully controlled to ensure uniform dispersion of fibers and Ferrock in the geopolymer matrix. The samples were cast into molds and demolded after 24 hours before being subjected to their respective curing conditions. Compressive strength tests were conducted at 7 and 28 days, while flexural strength tests provided insights into the toughness and crack resistance of the mortar. Additionally, the impact resistance test was performed using the drop-weight method to evaluate the energy absorption capacity of fiber-reinforced samples.

The final mixture proportions for the optimized compositions used in this study are presented in Table 1.

*Manuscript received July 13, 2024, Revised December 8, 2024, Accepted March 16, 2025.

[1] MSc Student of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran. **Email**: h.mosavi@guilan.ac.ir

[2] Associate professor department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Table 1. Final Mix Proportions (kg/m³)

Mix ID	Slag	Sand	Ferrock	Polypropylene Fibers	Sodium Silicate	Sodium Hydroxide	Silicate to Hydroxide Ratio	Liquid to Binder Ratio
1.5RF8P0.1	584	1270	51	0.91	191	127	1.5	0.5
1.5RF8P0.2	584	1270	51	1.82	191	127	1.5	0.5
1.5RF8P0.3	584	1270	51	2.73	191	127	1.5	0.5
1.5RF8P0.5	584	1270	51	4.55	191	127	1.5	0.5
2RF8P0.1	584	1270	51	0.91	212	106	2	0.5
2RF8P0.2	584	1270	51	1.82	212	106	2	0.5
2RF8P0.3	584	1270	51	2.73	212	106	2	0.5
2RF8P0.5	584	1270	51	4.55	212	106	2	0.5

3- Results and Discussion

The results demonstrated that ambient curing provided better performance compared to water curing. The optimum composition was identified as 8% Ferrock replacement with 0.1% polypropylene fibers, which achieved the highest compressive strength of 75.2 MPa after 28 days and flexural strength of 5.52 MPa. Electrical resistivity tests indicated a maximum value of 144.6 kΩ·cm, suggesting excellent resistance to chloride ion penetration. Ultrasonic pulse velocity results showed that increased fiber content reduced wave propagation speed, affecting material density. Impact resistance tests revealed that fiber addition significantly enhanced the material's toughness, with up to a 57% increase in resistance to crack propagation.

Further analysis showed that the geopolymerization process was influenced by the alkaline activator ratio, with a higher sodium silicate content improving mechanical performance. However, excessive fiber addition led to reduced workability and increased porosity, negatively impacting compressive strength. The study also confirmed that Ferrock improved the sustainability aspect of the mortar by reducing the carbon footprint associated with cementitious materials. The observed results align with previous research on geopolymer materials, reinforcing the potential of Ferrock-based binders in construction applications.

4- Conclusion

This study confirmed that using Ferrock in geopolymer mortars can significantly enhance mechanical properties while reducing environmental impact. The incorporation of polypropylene fibers further improved impact resistance and toughness, although excessive fiber content negatively affected compressive strength. The findings suggest that geopolymer mortars with optimized Ferrock and fiber content present a viable alternative to conventional cementitious materials, contributing to the development of sustainable construction materials.

Moreover, the experimental results highlight the importance of selecting appropriate activator ratios and fiber dosages to balance strength, durability, and workability. Future research should explore long-term durability aspects, including resistance to freeze-thaw cycles, sulfate attack, and carbonation, to further validate the applicability of Ferrock-geopolymer composites in real-world conditions. With increasing global efforts to minimize construction-related carbon emissions, this study provides valuable insights into the potential of alternative binder systems.

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن مهندسی روسازی ایران

انجمن بتن ایران

مطالعه تأثیر فعال کننده قلیایی بر خصوصیات استاتیکی و دینامیکی ملات‌های ژئوپلیمری حاوی فراک و الیاف*

مقاله پژوهشی

امیر حسین وارسته سیاه اسطلخی(۱)   سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد(۲)

DOI: 10.22067/jfcei.2025.88923.1312

چکیده سیمان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در جهان است. فرایند تولید این ماده آلاینده بوده و موجب انتشار گاز دی اکسید کربن در هوا می‌شود. علاوه بر تولید دی اکسید کربن، فرایند تولید سیمان سالانه میلیون‌ها تن گرد و غبار کوره سیمان را تولید می‌کند که موجب خطرات بهداشتی تنفسی و آلودگی می‌شود. فراک، یک ترکیب نوآورانه مبتنی بر آهن، جایگزینی بدون کربن برای سیمان است که از پسماندهای صنعتی برای یک مصالح ساختمانی چندمنظوره استفاده می‌کند. بر این اساس در پژوهش حاضر، به تأثیر فعال‌کننده قلیایی بر خصوصیات استاتیکی و دینامیکی ملات‌های ژئوپلیمری حاوی فراک و الیاف پلی‌پروپیلن پرداخته شد. متغیرهای این پژوهش شامل دو نسبت محلول به ماده پایه (۰/۴ و ۰/۵)، دو نسبت سیلیکات به هیدروکسید سدیم (۱/۵ و ۲)، درصدهای مختلف جایگزینی فراک (۵، ۸، ۱۲ و ۱۵ درصد) و الیاف پلی‌پروپیلن (۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵ درصد) در سه گام بود. نتایج نشان داد که عمل‌آوری در محیط نسبت به آب عملکرد بهتری دارد. نمونه‌های حاوی ۸ درصد فراک و ۰/۱ درصد الیاف بهترین عملکرد را نشان دادند. مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از ۲۸ روز به (۷۵/۲ MPa) رسید و مقاومت خمشی (۵/۵۲ MPa) ثبت شد. همچنین، در آزمایش مقاومت الکتریکی مقدار (۱۴۴/۶ kohm.cm) به‌عنوان بیشترین مقاومت الکتریکی ثبت گردید. استفاده از الیاف حتی در مقادیر کم، مقاومت ضربه‌ای را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد و در بهترین حالت، افزایش ۵۷ درصدی مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از فراک و الیاف پلی‌پروپیلن راهکاری مؤثر برای بهبود خواص مکانیکی و زیست‌محیطی ملات‌های ساختمانی است.

واژه‌های کلیدی فعال کننده قلیایی، فراک، سیمان سبز، ژئوپلیمر، الیاف.

Effect of Alkaline Activator on Static and Dynamic Properties of Geopolymer Mortars Containing Ferrock and Fibers

Amir Hosein Varasteh Siah Estalakhi   Seyed Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad

Abstract *Cement is one of the most widely used construction materials in the world. Its production process is highly polluting and leads to the release of carbon dioxide (CO_2) into the atmosphere. In addition to CO_2 emissions, cement production generates millions of tons of kiln dust annually, causing respiratory health risks and environmental pollution. Ferrock, an innovative iron-based compound, is a carbon-free alternative to cement that utilizes industrial waste for a versatile construction material. Accordingly, this study investigated the effect of alkaline activators on the static and dynamic properties of geopolymer mortars containing ferrock and polypropylene fibers. The variables in this study included two liquid-to-binder ratios (0.4 and 0.5), two sodium silicate-to-sodium hydroxide ratios (1.5 and 2), various replacement percentages of ferrock (5%, 8%, 12%, and 15%), and polypropylene fibers (0.1%, 0.2%, 0.3%, and 0.5%) across three steps. The results showed that curing in ambient conditions performed better than water curing. Samples containing 8% ferrock and 0.1% fibers exhibited the best performance. The compressive strength of the samples after 28 days reached 75.2 MPa, and the flexural strength was recorded at 5.52 MPa. Furthermore, in the electrical resistivity test, a maximum value of 144.6 kΩ·cm was observed. The inclusion of fibers, even in small amounts, significantly improved impact resistance, with a maximum increase of 57% being observed. These findings demonstrate that the use of ferrock and polypropylene fibers is an effective strategy for enhancing the mechanical and environmental properties of construction mortars.*

Key Words Alkaline Activator, Ferrock, Green Cement, Geopolymer, Fibers.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۴/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱۲/۲۵ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد عمران سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

(۲) نویسنده مسئول : دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

Email: h.mosavi@guilan.ac.ir

مقدمه

امروزه روش‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسید کربن، در اتمسفر به یک حوزه تحقیقاتی فعال تبدیل شده است. تغییرات اقلیمی باعث شده که دانشمندان به‌دنبال یافتن جایگزین‌های جدید برای مصالح ساختمانی باشند. سیمان که جزء اصلی بتن است، پس از آب دومین ماده پرکاربرد در جهان محسوب می‌شود و یکی از بزرگ‌ترین منابع انتشار گازهای کربنی ناشی از فعالیت‌های انسانی است. سیمان با اینکه در صنعت ساخت‌وساز جایگاه ویژه‌ای دارد، با مصرف بالای انرژی و انتشار گسترده دی‌اکسید کربن همراه است. برای هر تن سیمان تولید شده، مقدار قابل توجهی دی‌اکسید کربن آزاد می‌شود که تأثیرات منفی بر محیط زیست دارد. از سوی دیگر، ژئوپلیمرها به‌عنوان جایگزینی مناسب برای سیمان‌های پرتلند در نظر گرفته می‌شوند. ژئوپلیمرها مزایایی از جمله کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، هزینه‌های پایین‌تر تولید، دوام بالا در برابر عوامل خورنده و کسب مقاومت مکانیکی در زمان کوتاه دارند. این ویژگی‌ها ژئوپلیمرها را به یک گزینه پایدار و دوستدار محیط زیست برای جایگزینی سیمان پرتلند تبدیل کرده است. فراک، یک ماده نوآورانه مبتنی بر پودر آهن است که به‌عنوان یک جایگزین بدون کربن برای سیمان شناخته می‌شود. این پودر آهن، که به‌عنوان یک پسماند صنعتی از فرآیندهای فولادی به وجود می‌آید، با دی‌اکسید کربن و رطوبت واکنش می‌دهد و یک ماده کربناته قوی به نام فراک تولید می‌کند [1,2]. بر اساس تحقیقات صورت گرفته فراک به عنوان یک جایگزین مناسب برای سیمان شناخته می‌شود، زیرا منجر به کاهش ۸ تا ۱۱ درصدی انتشار دی اکسید کربن می‌شود و در ساخت و ساز مقرون به صرفه است [3]. فراک در مقایسه با سیمان پرتلند که در حال حاضر یکی از مصالح اصلی ساخت و ساز در سطح جهان است، پنج برابر استحکام بیشتری از خود نشان می‌دهد و قادر به تحمل فشار بالاتری قبل از شکستن است و همچنین به طور قابل توجهی انعطاف‌پذیرتر است [4]. فراک در برابر زنگ زدگی، اکسیداسیون، اشعه ماوراء بنفش، پوسیدگی و خوردگی مقاوم است. بنابراین، فراک را می‌توان برای کاربردهای دریایی مانند موج شکن، دیوارهای دریایی، اسکله‌ها، شمع‌های سازه‌ای، فونداسیون‌ها و سایر سازه‌های در معرض آب دریا استفاده کرد. همچنین دوام زیست محیطی آن باعث استفاده از آن در ساخت لوله‌هایی می‌شود که برای انتقال آب و دفع فاضلاب استفاده می‌شوند. فراک تحت تأثیر اجزای تشکیل دهنده آب‌های فاضلاب مانند سولفید هیدروژن و اسید سولفوریک قرار نمی‌گیرد که این موضوع باعث خوردگی لوله‌های سیمانی معمولی می‌شود .علاوه بر این، از آنجایی که فراک در مقایسه با بتن معمولی شکنندگی کمتری دارد، اتصال لوله‌ها به یکدیگر بهتر صورت می‌گیرد و در نتیجه آسیب کمتری در تراز و نصب مقاطع وارد می‌کند [5]. یکی از اشکالات اصلی بتن مقاومت کششی پایین آن است. از این نظر مشخص شده است که بتن معمولی از نظر شکل پذیری، ظرفیت خستگی، ظرفیت باربری پس از ترک، چقرمگی، سایش و مقاومت در برابر ضربه عملکرد ضعیفی دارد. استفاده از الیاف توزیع شده تصادفی در بتن یکی از مؤثرترین روش های مورد استفاده برای بهبود مقاومت فشاری و کششی، ظرفیت جذب انرژی و خواص ضعیف ذکر شده در بالا می‌باشد. یکی دیگر از جنبه های منفی نمونه‌های بتن، ترک‌های ناشی از پایداری ابعادی ضعیف است که استفاده از الیاف در بتن این ترک‌ها را کاهش می‌دهد [6]. در بتن معمولی که ماده‌ای شکننده است، گسیختگی ابتدا از نواحی ضعیف بین ملات و سنگدانه‌ها آغاز می‌شود، جایی که ترک‌هایی حتی پیش از بارگذاری وجود دارند. برای بهبود این نقص مکانیکی، چندین دهه است که از انواع الیاف در بتن استفاده می‌شود. همچنین، به دلیل ظرفیت پایین تحمل تغییر شکل در بتن معمولی، ترک‌ها به‌سرعت گسترش یافته و منجر به شکست آن می‌شوند. استفاده از الیاف در بتن نه تنها گسترش ترک‌ها را کاهش می‌دهد بلکه شکل‌پذیری آن را نیز افزایش می‌دهد [7]. الیاف پلی پروپیلن نسل جدیدی از الیاف شیمیایی است. کاربرد این الیاف در ساخت و ساز تا حد زیادی افزایش یافته است زیرا افزودن الیاف در بتن باعث بهبود استحکام کششی، مقاومت خمشی، چقرمگی، مقاومت ضربه ای و همچنین حالت شکست بتن می‌شود [8]. هنگامی که الیاف پلی پروپیلن به بتن اضافه می‌شود، ساختار شبکه توزیع تصادفی سه بعدی را می‌توان در بتن تشکیل داد که به طور مؤثری از تولید و توسعه ریزترک جلوگیری می‌کند. در نتیجه، الیاف پلی پروپیلن می‌تواند از ورود آب و سایر یون های مضر به بتن جلوگیری کند و دوام بتن را بهبود می‌بخشد [9]. همچنین بر اساس تحقیقات صورت گرفته الیاف پلی پروپیلن به عنوان یک شتاب دهنده در بتن عمل میکند و باعث تسریع در واکنش هیدراتاسیون می‌شود [10].

با توجه به اینکه فراک یک ماده بتنی جدید است و مطالعات محدودی بر روی آن انجام شده، نوآوری این پژوهش در استفاده از محلول‌های قلیایی در ترکیب با مواد فراک نهفته است که نیازمند تحقیقات بیشتری می‌باشد. در این مقاله، تأثیر فعال‌کننده‌های قلیایی بر خصوصیات استاتیکی و دینامیکی ملات‌های ژئوپلیمری حاوی مواد فراک و الیاف بررسی شده است تا مشخص شود ترکیب مواد فراک با الیاف پلی‌پروپیلن در درصدهای مختلف چه نتایجی ارائه می‌دهد و تا چه اندازه در بهبود کیفیت این نوع ملات مؤثر است.

ساخت ملات ژئوپلیمری الیافی

معمولا ملات مسلح به الیاف همانند ملات ساده ریخته و متراکم می‌شود . روش طراحی مخلوط‌های ملات مسلح به الیاف اساسا شبیه طراحی ملات ساده است .با وجود این، باید برخی ملاحظات برای پخش یکنواخت الیاف و جلوگیری از جداشدگی یا پدیده گلوله‌ای شدن و ایجاد یک مخلوط کارا جهت ریختن، تراکم و پرداخت ملات به عمل آید . الیاف به خاطر آسانی پخش باید به صورت خشک وارد مخلوط شوند. مشکل گلوله ای شدن اغلب به دلیل استفاده از مقادیر زیاد الیاف و یا اضافه کردن خیلی سریع الیاف به مخلوطی که آب کافی و یا کارایی کافی ندارد به وجود می‌آید. در این پدیده الیاف نزدیک به هم جمع شده، سبب کاهش کارایی مخلوط و در نتیجه کاهش مقاومت و نرمی ملات سخت شده می‌گردد [11].

مصالح مصرفی

سرباره کوره آهن‌گدازی

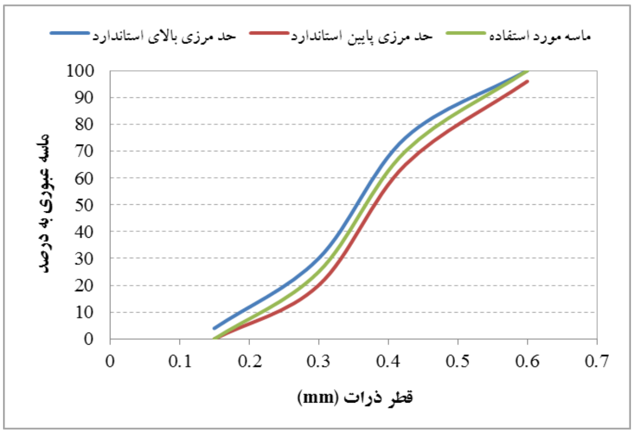
سرباره نیز با توجه به وجود کارخانه‌های صنعتی بسیار در ایران امکان بهره‌برداری و تولید آن در ایران بسیار می‌باشد. از این رو سرباره مصرفی در این تحقیق به صورت پودر آماده شده از شرکت دانش بنیان بنا بنیان زیست فناور تهیه شده است که پس از عبور از الک نمره ۴۰ از آن استفاده می‌شود. مشخصات شیمیایی سرباره کوره آهن‌گدازی استفاده شده در این تحقیق در جدول (۱) قابل مشاهده است.

جدول ۱ مشخصات شیمیایی سرباره کوره آهن‌گدازی

ترکیب شیمیایی	درصدهای تشکیل دهنده
SiO_2	۳۵/۷
Al_2O_3	۱۱/۲
Fe_2O_3	۱/۲
CaO	۳۷
MgO	۱۱
K_2O	۰/۶۸
Na_2O	۰/۶
Cl	۰/۰۰۲
Mno	۱/۵۸

ماسه

ماسه مصرفی از نوع سیلیکاتی طبیعی و رودخانه‌ای ۳-۰ میلی‌متر از کارخانه قطعات پیش‌ساخته شمال تهیه گردید. همچنین ماسه مورد استفاده به منظور زدودن ذرات رس و لای شسته شد. دانه-بندی ماسه مورد استفاده در ساخت ملات مطابق با استاندارد [12] ASTM C778 انجام شد. حدود دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در ساخت ملات‌ها، در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱ حدود دانه‌بندی ماسه

الیاف

الیاف پلی پروپیلن (پ پ) یک افزودنی بتن تولید شده از مواد ترکیبی پلیمری مختلف با پایه پروپیلن متشکل از رشته‌های بسیار نازک تک رشته‌ای است که باعث ایجاد یک سیستم بتن الیافی با کیفیت بالا می‌شود. این الیاف در دو اندازه ۱۲ و ۶ میلیمتری تولید

می‌شود که اندازه ۶ میلیمتری برای ملات مورد استفاده قرار می‌گیرد.

هیدروکسید سدیم

هیدروکسید سدیم مصرفی بصورت پرک شده و با درجه خلوص ۹۸ درصد از شرکت کیمیا پارس شایانکار تهیه شده است.

سیلیکات سدیم

سیلیکات سدیم یا آب شیشه (Na_2SiO_3) مصرفی در این تحقیق از شرکت صنایع سیلیکات ایران تهیه شده است.

آب

آب مورد استفاده در این پژوهش آب شرب شهر رشت می‌باشد.

فراک

برای ساخت فراک از مصالح جدول (۲) استفاده شده است.

جدول ۲ مصالح مورد نیاز برای تولید فراک [5]

مصالح	درصد (بر حسب وزن)
پودر آهن	۶۰%
خاکستر بادی	۲۰%
سنگ آهک	۱۰%
متاکائولن	۸%
اگزالیک اسید	۲%

طرح اختلاط

در این تحقیق سرباره بعنوان ماده پایه اصلی در ساخت ملات‌های ژئوپلیمری استفاده می‌گردد. ابتدا طرح شاهد در گام اول با دو نسبت مواد محلول به ماده پایه ۰/۴ و ۰/۵ و با دو نسبت سیلیکات به هیدروکسید سدیم ۱/۵ و ۲ ساخته شد و پس از آزمایش مقاومت فشاری ۷ روزه طرح‌های بهینه برای گام بعدی انتخاب گردید. در گام دوم مواد فراک با مقادیر ۵ ، ۸ ، ۱۲ و ۱۵ درصد وزنی جایگزین سرباره می‌گردد و نیمی از نمونه‌ها در آب و نیمی دیگر در محیط عمل آوری می‌شود پس ازگذشت ۷ روز آزمایش مقاومت فشاری انجام پذیرفت و طرح‌های بهینه حاوی مواد فراک برای گام نهایی انتخاب شد. در گام نهایی از الیاف پلی پروپیلن با مقادیر ۰/۱ ، ۰/۲ ، ۰/۳ و ۰/۵ درصد حجمی کل در طرح‌ها استفاده گردید و پس از انجام آزمایش های مختلف طرح بهینه حاوی مواد فراک مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن را بدست آمد.

گام اول : ساخت طرح‌های شاهد با دو نسبت مواد محلول به ماده پایه ۰/۴ و ۰/۵ و با دو نسبت سیلیکات به هیدروکسید سدیم ۱/۵ و ۲ با هدف انتخاب طرح‌های بهینه شاهد برای ورود به گام دوم در جدول (۳) ارائه شده است.

گام دوم : ساخت طرح با جایگزینی وزنی ۵ ، ۸ ، ۱۲ و ۱۵ درصد مواد فراک با سرباره در طرح‌های بهینه‌ی 1.5R0.5 , 2R0.5 بدست آمده از گام اول با هدف انتخاب طرح‌های بهینه حاوی مواد فراک برای ورود به گام نهایی طراحی شد.

گام نهایی: افزودن الیاف پلی پروپیلن ۰/۱ ، ۰/۲ ، ۰/۳، ۰/۵ درصد حجمی کل به طرح بهینه 1.5RF8 , 2RF8 حاوی فراک بدست آمده از گام دوم (جدول ۴) برای انتخاب طرح بهینه حاوی مواد فراک مسلح به الیاف پلی پروپیلن طراحی گردید که در جدول (۵) قابل مشاهده است.

جدول ۳ طرح اختلاط گام اول (کیلوگرم بر مترمکعب)

شماره	نام طرح	سرباره	ماسه	سیلیکات	هیدروکسید	نسبت سیلیکات به هیدروکسید	نسبت مواد محلول به سرباره
1	1.5R0.4	665	1330	160	106	1.5	0.4
2	1.5R0.5	635	1270	191	127	1.5	0.5
3	2R0.4	665	1330	177	89	2	0.4
4	2R0.5	635	1270	212	106	2	0.5

جدول ۴ طرح اختلاط گام دوم (کیلوگرم بر مترمکعب)

شماره	نام طرح	سرباره	ماسه	فراک	سیلیکات	هیدروکسید	نسبت سیلیکات به هیدروکسید	نسبت مواد محلول به سرباره
1	1.5RF5	603	1270	32	191	127	1.5	0.5
2	1.5RF8	584	1270	51	191	127	1.5	0.5
3	1.5RF12	572	1270	64	191	127	1.5	0.5
4	1.5RF15	559	1270	76	191	127	1.5	0.5
5	2RF5	603	1270	32	212	106	2	0.5
6	2RF8	584	1270	51	212	106	2	0.5
7	2RF12	572	1270	64	212	106	2	0.5
8	2RF15	559	1270	76	212	106	2	0.5

جدول ۵ طرح اختلاط گام نهایی (کیلوگرم بر مترمکعب)

شماره	نام طرح	سرباره	ماسه	فراک	الیاف پلی پروپیلن	سیلیکات	هیدروکسید	نسبت سیلیکات به هیدروکسید	نسبت مواد محلول به سرباره
1	1.5RF8P0.1	584	1270	51	0.91	191	127	1.5	0.5
2	1.5RF8P0.2	584	1270	51	1.82	191	127	1.5	0.5
3	1.5RF8P0.3	584	1270	51	2.73	191	127	1.5	0.5
4	1.5RF8P0.5	584	1270	51	4.55	191	127	1.5	0.5
5	2RF8P0.1	584	1270	51	0.91	212	106	2	0.5
6	2RF8P0.2	584	1270	51	1.82	212	106	2	0.5
7	2RF8P0.3	584	1270	51	2.73	212	106	2	0.5
8	2RF8P0.5	584	1270	51	4.55	212	106	2	0.5

نحوه اختلاط و آماده‌سازی نمونه‌ها

قبل از ساخت ملات، محلول هیدروکسید با مولاریته ۱۲ با یک لیتر آب و ۴۸۰ گرم هیدروکسید مخلوط و به خوبی هم زده می‌شود. به علت گرمازا بودن این محلول بهتر است از یک روز قبل ساخته شود . برای ساخت ملات، ابتدا مطابق طرح اختلاط وزن‌کشی انجام شده، مصالح شامل ماسه و الیاف را درون استانبولی ریخته و به مدت یک دقیقه ماسه و الیاف را به صورت خشک مخلوط می‌شود و سپس مقدار آب اشباع با سطح خشک (ssd) را به صورت تدریجی به مصالح اضافه کرده و به مدت دو دقیقه هم زده و سپس سرباره اضافه می‌گردد. پس از هم زدن مخلوط، مواد فراک را به آن اضافه و مجدد هم زده می‌شود. در ظرفی جداگانه سیلیکات را به همراه محلول هیدروکسید و آب اضافه ریخته و بعد از هم زدن کامل، به ملات اضافه کرده و کل مصالح را با هم مخلوط می‌کنیم. پس از ساخت ملات آن را در سه مرحله در قالب از پیش آماده شده ریخته و در هر مرحله به وسیله میله فولادی (تخماق) ملات را متراکم و پس از آن ویبره و در نهایت به وسیله ماله سطح آن را صاف می‌کنیم. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت جهت سخت شدن ملات در شرایط دمایی و رطوبتی ثابت، نگهداری شده و پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب ها خارج می‌گردد.

آزمایش های انجام شده

آزمایش تعیین مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C109 [13] جهت اندازه گیری مقاومت فشـــاری نمونه‌های مکعبی ۵×۵×۵ سانتیمتر که در شرایط ا ستاندارد عمل آوری شده در سن ۷ و

۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفته است. نحوه قرار گیری و شکست نمونه در شکل (۲ و ۳) آورده شده است.



شکل ۲ نحوه قرار گیری نمونه



شکل ۳ لحظه شکست نمونه

آزمایش مقاومت کششی ناشی از خمش (مقاومت خمشی)

آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه ای بر اساس استاندارد [14] ASTM C348-08 جهت اندازه گیری مقاومت خمشی نمونه‌های مکعب مستطیلی ۱۶×۴×۴ سانتیمتر بعد از شرایط استاندارد عمل آوری در سن ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفته است. در پایان آزمایش، مقاومت خمشی نمونه با استفاده از معادله زیر به‌دست آمد. نحوه قرار گیری و شکست نمونه در شکل (۴ و ۵) آورده شده است.

$$S_f=\frac{3pl}{2bh^2} \quad (1)$$

S_f: مقاومت خمشی بر حسب مگاپاسکال

p: نیروی اعمالی در وسط دهانه بر حسب نیوتن

b: عرض مقطع بر حسب میلی متر

h: ارتفاع مقطع بر حسب میلی متر

l: فاصله بین دو تکیه گاه بر حسب میلی‌متر



شکل ۴ نحوه قرار گیری نمونه



شکل ۵ لحظه شکست نمونه

آزمایش مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی بر اساس استاندارد [15] ASTM C1202-10 جهت اندازه گیری مقاومت الکتریکی روی نمونه‌های ۵×۵×۵ سانتیمتر در سن ۲۸ روزه توسط دستگاه تست مقاومت الکتریکی انجام می‌گردد. این آزمایش برای تعیین میزان مقاومت بتن در برابر عبور جریان الکتریکی که یکی از پارامترهای مهم مربوط به خوردگی بتن است استفاده می‌گردد. هر چه مقاومت الکتریکی بالاتر باشد، نفوذپذیری کمتر خواهد بود. مقاومت الکتریکی با قرار دادن نمونه بین دو صفحه مسی در

تماس با سطح نمونه و اندازه گیری جریان با استفاده از معادله زیر به‌دست می‌آید همچنین نحوه انجام آزمایش در شکل (۶) آورده شده است.

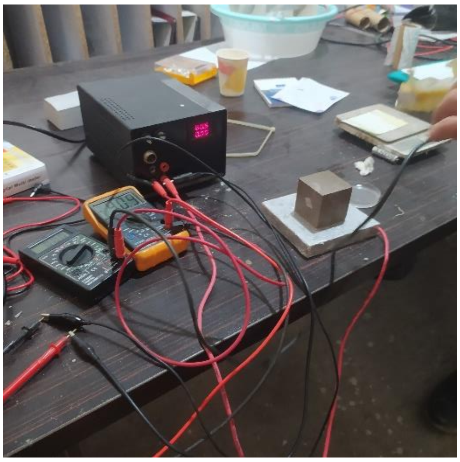
$$\rho = R \times \frac{A}{L} \quad (۲)$$

ρ : مقاومت الکتریکی

R: نسبت ولتاژ به جریان

A: سطح مقطع نمونه

L: طول قطعه



شکل ۶ انجام آزمایش مقاومت الکتریکی

آزمایش التراسونیک

آزمایش التراسونیک بتن یکی از آزمایش های بتن از نوع غیر مخرب و برای سنجش میزان مقاومت بتن می‌باشد. آزمایش التراسونیک بر اساس استاندارد [16] ASTM C597-22 صورت می‌گیرد. مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی را میتوان به کمک دستگاه التراسونیک به‌دست آورد بدین صورت که بوسیله دستگاه التراسونیک، مدت زمان عبور امواج صوتی در جهت طولی نمونه-های بتنی اندازه گیری می‌شود و با توجه به ابعاد نمونه، سرعت عبور امواج التراسونیک مطابق با معادلات[17] زیر به‌دست می‌آید. برای انجام این آزمون از نمونه‌های ۵×۵×۵ سانتیمتر در سن ۲۸ روزه استفاده می‌گردد. کالیبره کردن دستگاه و انجام آزمایش در شکل (۷ و ۸) آورده شده است.

$$E_d = \left[\frac{U^2 \rho}{g}\right] \times 10^{-2} \quad (۳)$$

E_d= مدول الاستیسیته دینامیکی (GPa)

U= سرعت عبور امواج التراسونیک (km/s)

ρ= چگالی بتن (kg/m^3)

g = گرانش زمین ($9.81\ m/s^2$)

$$E_s = 1.25E_d - 19 \quad (۴)$$

E_s : مدول الاستیسیته استاتیکی (GPa)

E_d : مدول الاستیسیته دینامیکی (GPa)



شکل ۷ کالیبره کردن دستگاه



شکل ۸ انجام آزمایش التراسونیک

آزمایش مقاومت ضربه ای

آزمایش تعیین مقاومت ضربه ای بر اساس استاندارد ACI 544-2R [18] بر روی نمونه‌های استوانه ای با قطر ۱۵ و ضخامت ۶،۵ سانتیمتر در سن ۲۸ روزه مطابق با روش Drop-weight test (آزمایش سقوط وزنه) انجام می‌شود. قرارگیری نمونه، ترک اولیه

و شکست نهایی در شکل (۹ و ۱۰ و ۱۱) آورده شده است.



شکل ۹ نحوه قرارگیری نمونه



شکل ۱۰ لحظه ایجاد ترک اولیه



شکل ۱۱ لحظه شکست نهایی

آزمایش جذب آب

آزمایش جذب آب بر روی آزمونه های ۵×۵×۵ سانتیمتر در سن ۲۸ روزه مطابق استاندارد ASTM C948 [19] انجام می‌شود. درصد جذب آب با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌گردد همچنین وزن‌کشی نمونه‌ها در حالت اشباع و قرار گیری در آون آزمایشگاهی در شکل (۱۲ و ۱۳) آورده شده است.

$$\text{جذب آب} = \frac{B-C}{C} \times 100 \qquad (5)$$

B: جرم اشباع با سطح خشک

C: جرم خشک شده در اون



شکل ۱۲ وزن‌کشی نمونه‌ها



شکل ۱۳ قرار دادن نمونه‌ها در آون

آزمایش جرم حجمی

آزمایش جرم حجمی بر روی آزمونه های ۵×۵×۵ سانتیمتر در سن ۲۸ روزه مطابق استاندارد ASTM C948 [19] انجام می‌شود.

جرم حجمی با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌گردد همچنین وزن کردن نمونه‌ها در حالت اشباع در شکل (۱۴) آورده شده است.

$$\text{جرم حجمی} = \frac{B}{B-A} \qquad (۶)$$

A: جرم غوطه‌وری

B: جرم اشباع با سطح خشک



شکل ۱۴ وزن کردن نمونه

ارائه و تفسیر نتایج

مقاومت فشاری

در گام اول پس از گذشت ۷ روز از ساخت نمونه‌ها آن ها را در جک فشاری قرار داده و نتایج در جدول (۶) ارائه شده است. با توجه به اینکه طرح‌های شماره ۲ و ۴ تنش بالاتری دارند آن ها برای گام دوم انتخاب شدند.

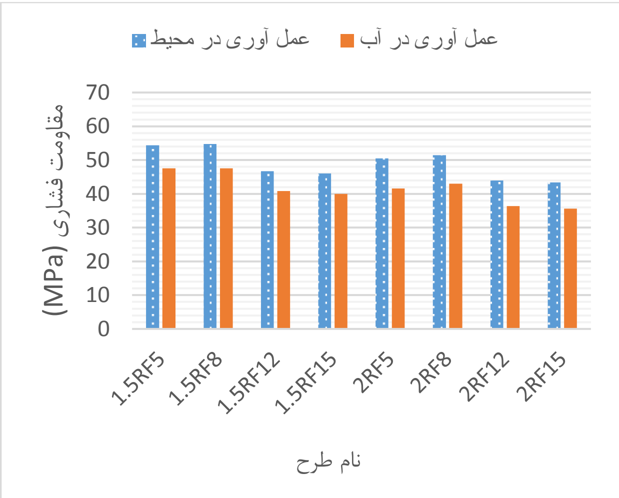
جدول ۶ نتایج شکست ۷ روزه گام اول

شماره	نام طرح	تنش (MPa)
1	1.5R0.4	57.8
2	1.5R0.5	60.4
3	2R0.4	54
4	2R0.5	56.4

در گام دوم، نیمی از نمونه‌ها را در آب و نیمی دیگر را در محیط قرار داده شد و پس از ۷ روز از ساخت نمونه‌ها، نتایج زیر حا صل شده است. همانطور که در جدول (۷) و شکل (۱۵)، از نتایج مشخص است، نتایج عمل‌آوری در آب کمتر از عمل‌آوری در محیط بوده و در نتیجه، نتایج عمل‌آوری در آب را حذف کرده و در ادا مه از نتایج عمل‌آوری در محیط استفاده می‌شود. طرح‌های شماره ۲ و ۶ به‌واسطه مقاومت‌های بالاتر برای گام نهایی انتخاب می‌شوند.

جدول ۷ نتایج شکست ۷ روزه گام دوم

شماره	نام طرح	تنش (MPa)	
		عمل آوری در آب	عمل آوری در محیط
1	1.5RF5	47.6	54.4
2	1.5RF8	47.6	54.8
3	1.5RF12	40.8	46.7
4	1.5RF15	40	46
5	2RF5	41.6	50.5
6	2RF8	43	51.4
7	2RF12	36.4	44
8	2RF15	35.6	43.4



شکل ۱۵ مقایسه نتایج شکست گام دوم

در گام نهایی، نمونه‌ها پس از گذشت ۷ و ۲۸ روز مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند و نتایج زیر حاصل شده است. با توجه به نتایج موجود در جدول (۸)، طرح شماره ۱ با نسبت سیلیکات به هیدروکسید ۱،۵ و الیاف با ۰،۱ درصد حجمی، که کمترین درصد الیاف را داراست، مقاومت فشاری بالاتری نسبت به دیگر طرح‌ها از خود نشان داده است. با مقایسه نتایج گام دوم با گام نهایی، می‌توان اشاره کرد که افزودن الیاف پلی پروپیلن منجر به افزایش ۱۲،۶ درصدی مقاومت فشاری

می‌شود. همچنین در تحقیقات پیشین [2] نیز مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی فراک نسبت به نمونه‌های بتن معمولی در سن ۷ و ۲۸ روزه افزایش داشته که نشانگر همسو بودن تحقیقات می‌باشد.

جدول ۸ نتایج شکست ۷ و ۲۸ روزه گام نهایی

شماره	نام طرح	تنش (MPa)	
		نتایج شکست ۲۸ روزه	نتایج شکست ۷ روزه
1	1.5RF8P0.1	75.2	61.73
2	1.5RF8P0.2	58.4	48.13
3	1.5RF8P0.3	70.2	44.8
4	1.5RF8P0.5	60	42.93
5	2RF8P0.1	58.53	45.87
6	2RF8P0.2	55.33	44.67
7	2RF8P0.3	65.6	40.8
8	2RF8P0.5	61.8	34

مقاومت کششی ناشی از خمش (مقاومت خمشی)

در آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های مکعب مستطیلی ۱۶×۴×۴ سانتیمتر را درون دستگاه تحت آزمایش خمش سه نقطه ای قرار دادیم و پس از انجام محاسبات نتایج در جدول (۹) ارائه شده است. با توجه به نتایج موجود طرح شماره ۱ با نسبت سیلیکات به هیدروکسید ۱٫۵ و الیاف با ۰٫۱ درصد حجمی مقاومت خمشی بالاتری نسبت به دیگر طرح‌ها از خود نشان داده است. بر اساس تحقیقات شیوانی و همکاران [20]، مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی ۸ درصد فراک، مقاومتی ۴٫۰۱ مگاپاسکال داشته است که در این تحقیق مقاومت به ۵٫۵۲ مگاپاسکال رسیده و نشانگر بهبود مقاومت خمشی می‌باشد.

جدول ۹ نتایج مقاومت خمشی

شماره	نام طرح	مقاومت خمشی (MPa)
1	1.5RF8P0.1	5.52
2	1.5RF8P0.2	4.73
3	1.5RF8P0.3	5.17
4	1.5RF8P0.5	5.3
5	2RF8P0.1	3.41
6	2RF8P0.2	2.79
7	2RF8P0.3	3.07
8	2RF8P0.5	4.17

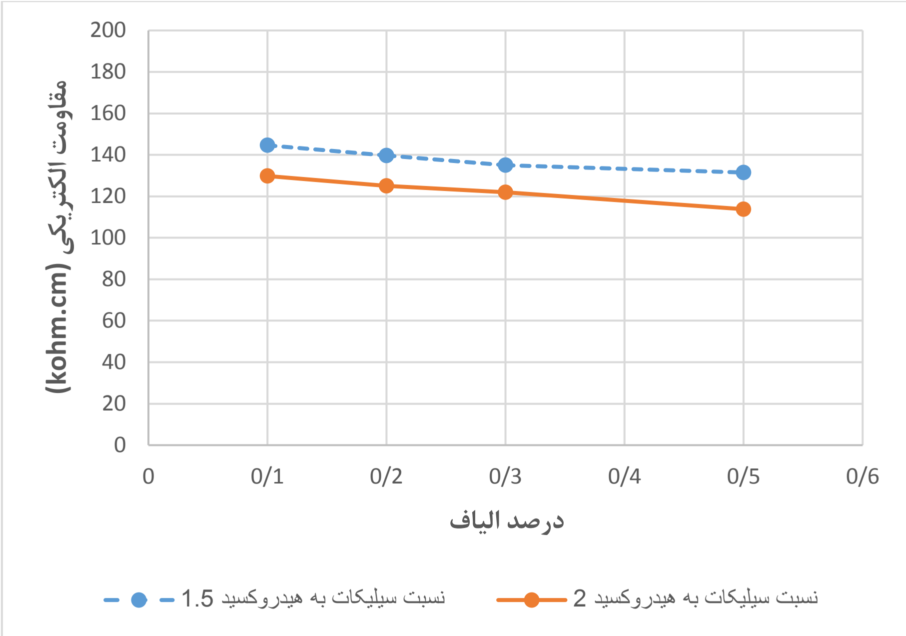
مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌های ۵×۵×۵ سانتیمتر در سن ۲۸ روزه توسط دستگاه تست مقاومت الکتریکی انجام می‌گردد. با بالا رفتن مقاومت الکتریکی، جریان عبوری از بتن کاسته شده و خوردگی کمتر می‌شود. با توجه به نتایج موجود در جدول (۱۰)، طرح شماره ۱ با نسبت سیلیکات به هیدروکسید ۱٫۵ و الیاف با ۰٫۱ درصد حجمی، مقاومت الکتریکی بالاتری نسبت به دیگر طرح‌ها از خود نشان داده و بر اساس آیین نامه آشتو [21] احتمال خوردگی ندارد.

همچنین با مقایسه دو نسبت سیلیکات به هیدروکسید در شکل (۱۶) نیز مشاهده می شود که طرح‌هایی با حداقل الیاف، مقاومت الکتریکی بالاتری نسبت به دیگر طرح‌ها دارند.

جدول ۱۰ نتایج مقاومت الکتریکی

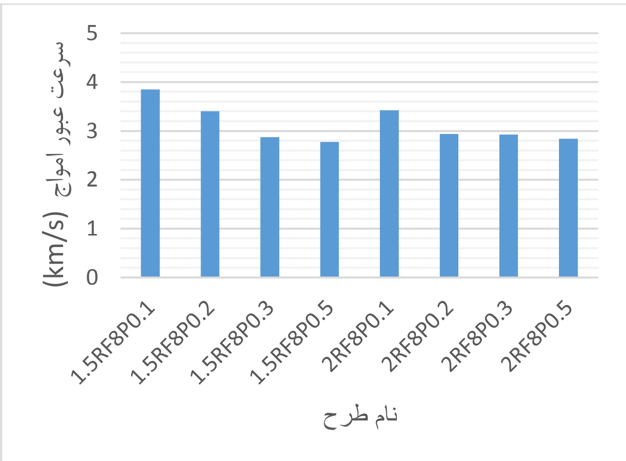
شماره	نام طرح	مقاومت الکتریکی (kohm.cm)	جریان (mA)	ولتاژ (v)
1	1.5RF8P0.1	144.6	1.4	40.5
2	1.5RF8P0.2	139.7	1.45	40.5
3	1.5RF8P0.3	135	1.5	40.5
4	1.5RF8P0.5	131.5	1.54	40.5
5	2RF8P0.1	129.8	1.56	40.5
6	2RF8P0.2	125	1.62	40.5
7	2RF8P0.3	122	1.66	40.5
8	2RF8P0.5	113.8	1.78	40.5



شکل ۱۶ مقاومت الکتریکی بر حسب درصد های مختلف الیاف پلی پروپیلن

التراسونیک

آزمایش الترا سونیک یکی از آزمایش های غیر مخرب ا ست که اغلب در ارزیابی سازه های بتنی ا ستفاده می شود. این روش به طراحان و متخصصان در زمینه هایی مانند مقاوم سازی، تقویت و اعتبارسنجی عملیات، امکان تصمیمگیری درست را میدهد. از طریق این آزمایش تعیین یکنواختی بتن در یک عضو سازه یا بین اعضای آن، کشف وجود ترک و اندازه گیری عمق آن و دیگر نار ساییها مانند منافذ، مدول الا ستیسیته، ضریب پوا سون دینامیکی و ... را میتوان بررسی کرد. ا ساس کار این آزمایش بر مبنای سرعت عبور امواج پالسی ماورای صوت از میان نمونهها است. نتایج آزمایش التراسونیک در شکل (۱۷) آورده شده است. همانطور که مشاهده میشود سرعت عبور امواج با افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن کاهش می یا بد. همچنین میتوان کیفیت بتن را بر ا ساس نتایج آزمایش سرعت تعیین کرد. مطابق جدول (۱۱) و بر اساس نتایج بدست آمده طرح شماره ۱ در رده با کیفیت خوب طبقه بندی میشود. همچنین با توجه به طرح شماره ۱ که سرعت امواج عبوری آن ۳٫۸۴۶ کیلومتر بر ثانیه ا ست این طرح با توجه به تحقیقات وایت هر ست [22] از مقاومت خوبی برخوردار میباشد.



شکل ۱۷ نتایج آزمایش التراسونیک

جدول ۱۱ طبقه بندی کیفیت بر اساس آزمایش اولتراسونیک [22]

سرعت (km/s)	کیفیت
۴٫۵<	عالی
۴٫۵ – ۳٫۵	خوب
۳٫۵ – ۳	مشکوک
۳ – ۲	ضعیف
۲ >	خیلی ضعیف

جدول ۱۲ نتایج مدول الاستیسیته با استفاده از التراسونیک

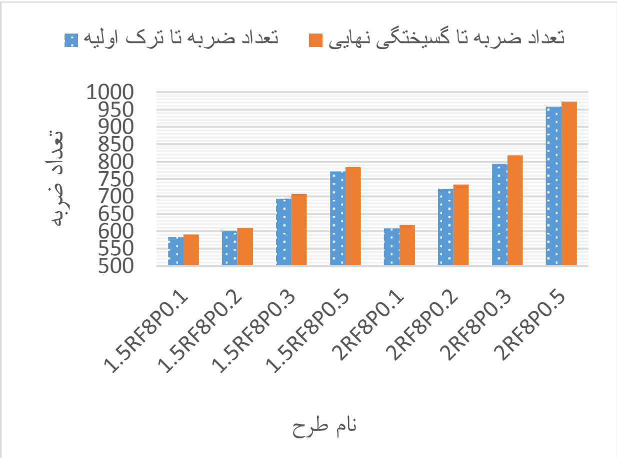
شماره	نام طرح	سرعت (km/s)	مدول الاستیسیته دینامیکی(GPa)	مدول الاستیسیته استاتیکی(GPa)
1	1.5RF8P0.1	3.846	33.172	22.465
2	1.5RF8P0.2	3.401	25.939	13.423
3	1.5RF8P0.3	2.873	18.510	4.1375
3	1.5RF8P0.5	2.777	17.294	2.617
5	2RF8P0.1	3.424	26.291	13.863
6	2RF8P0.2	2.941	19.397	5.246
7	2RF8P0.3	2.923	19.160	4.950
8	2RF8P0.5	2.840	18.087	3.608

مدول الاستیسیته

آزمایش التراسونیک بر روی نمونه‌های ۵×۵×۵ سانتیمتر در سن ۲۸ روزه صورت گرفت و پس از یادداشت نتایج از آن ها برای دست یابی به مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی استفاده به عمل آمد که نتایج مدول الاستیسیته در جدول (۱۲) قابل مشاهده است. همانطور که در نتایج مشاهده میشود طرح شماره ۱ با نسبت سیلیکات به هیدروکسید ۱,۵ و الیاف با ۰,۱ درصد حجمی مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی بالاتری نسبت به دیگر طرح‌ها از خود نشان داده است. همچنین برای نسبت سیلیکات به هیدروکسید ۲ میتوان عنوان کرد که پس از طرح شماره ۱ با نسبت ۱,۵ طرح شماره ۵ مدول الاستیسیته دینامکی و استاتیکی بالایی دارد.

مقاومت ضربه ای

آزمایش سقوط وزنه بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵ و ضخامت ۶,۵ سانتیمتر در سن ۲۸ روزه انجام گرفت، بدین صورت که وزنه‌ای با وزن ۴,۵۴ کیلوگرم از ارتفاع ۴۵۷ میلیمتری بر روی نمونه رها شده و این پرتاب آنقدر تکرار می‌شود تا ابتدا ترک اولیه و سپس شکست رخ دهد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در شکل (۱۸)، افزایش درصد الیاف پلی‌پروپیلن در طرح‌ها باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها در برابر ضربه می‌شود و از ترک خوردگی جلوگیری می‌کند.



شکل ۱۸ نتایج مقاومت ضربه ای

جذب آب

برای محاسبه جذب آب به دو جرم اشباع با سطح خشک و جرم خشک نمونه در آون نیاز است. ابتدا نمونه‌ها را وزن کرده و سپس درون آب به مدت حداقل ۲۴ ساعت قرار داده می‌شوند. پس از آن نمونه‌ها را با یک پارچه خشک کرده و وزن آن یادداشت می‌شود. جهت تعیین جرم خشک در آون، نمونه‌ها پس از خشک شدن تدریجی در محیط آزمایشگاه، در داخل آون با دمای ۱۰۰ الی ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. سپس نمونه‌ها از آون خارج و پس از رسیدن به دمای محیط توسط ترازوی دیجیتالی توزین شدند و به عنوان جرم خشک نمونه یادداشت شد. مقدار درصد جذب آب با استفاده از روابط موجود محاسبه گردید. همانطور که مشخص است، بتن‌هایی با نفوذپذیری بالا منجر به ضعف مقاومتی و عدم کارآمدی مناسب می‌شوند و بزرگترین مشکل نفوذپذیری، مناسب بودن شرایط

حمله مخرب‌های شیمیایی مانند کلرید می‌باشد. با توجه به نتایج موجود در جدول (۱۳)، طرح شماره ۱ با نسبت سیلیکات به هیدروکسید ۱٫۵ و الیاف با ۰٫۱ درصد حجمی، کمترین مقدار جذب آب را نسبت به دیگر طرح‌ها دارد. با توجه به تحقیقات ویلسون و همکاران [23]، درصد جذب آب بین ۴ تا ۶ درصد خوب تلقی می‌شود که این یافته با نتایج به‌دست‌آمده مطابقت دارد.

جدول ۱۳ نتایج جذب آب

شماره	نام طرح	درصد جذب آب
1	1.5RF8P0.1	4.64
2	1.5RF8P0.2	5.36
3	1.5RF8P0.3	5.86
4	1.5RF8P0.5	5.92
5	2RF8P0.1	5.03
6	2RF8P0.2	5.13
7	2RF8P0.3	5.26
8	2RF8P0.5	5.54

جرم حجمی

برای محاسبه جرم حجمی، به دو مقدار جرم اشباع با سطح خشک و جرم غوطه‌وری نمونه در آب نیاز است. مطابق استاندارد، ابتدا باید جرم غوطه‌وری نمونه اشباع با سطح خشک در آب تعیین شود. برای این منظور، پس از قرارگیری نمونه‌ها برای خشک شدن تدریجی در محیط آزمایشگاه، آن‌ها به مخزن آبی با دمای 23±2 °C بازگردانده شدند. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از مخزن خارج شده و رطوبت سطحی آن‌ها با حوله خشک شد و سپس توزین شدند. برای تعیین جرم غوطه‌وری، نمونه در ظرف آبی که وزن آب و ظرف از قبل مشخص است، به کمک یک توری پلاستیکی فاقد خاصیت جذب آب، به حالت غوطه‌ور قرار گرفت. اختلاف وزن به‌دست‌آمده، جرم غوطه‌وری نمونه محسوب شد. در ادامه، مطابق استاندارد، نمونه از آب خارج شده و رطوبت سطحی آن به سرعت توسط حوله خشک شد و توزین گردید. مقدار توزین‌شده به‌عنوان جرم اشباع با سطح خشک ثبت شد. سپس، با استفاده از روابط موجود، جرم حجمی نمونه محاسبه گردید. با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول (۱۴)، تمامی طرح‌ها جرم حجمی قابل قبولی دارند.

جدول ۱۴ نتایج جرم حجمی

شماره	نام طرح	جرم حجمی (t/m3)
1	1.5RF8P0.1	2.240
2	1.5RF8P0.2	2.224
3	1.5RF8P0.3	2.198
4	1.5RF8P0.5	2.195
5	2RF8P0.1	2.212
6	2RF8P0.2	2.208
7	2RF8P0.3	2.200
8	2RF8P0.5	2.200

نتیجه گیری

در این مقاله خصوصیات استاتیکی و دینامیکی ملات‌های حاوی مواد فراک و الیاف پلی پروپیلن با درصد های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج به شرح زیر است:

۱. جایگزینی ۸ درصدی مواد فراک با سرباره و همچنین استفاده ۰٫۱ درصد حجمی از الیاف پلی پروپیلن نتایج مطلوبی را در تمامی آزمایش های انجام شده از خود نشان داد.

۲. نمونه‌هایی که درصد کمتری از الیاف پلی‌پروپیلن (۰٫۱ درصد) به آن‌ها اضافه شد، مقاومت فشاری بیشتری را پس از ۲۸ روز (۷۵٫۲ MPa) کسب کردند.

۳. استفاده از درصد حجمی بالاتر الیاف پلی‌پروپیلن در ملات، باعث کاهش مقاومت فشاری و برخی دیگر از نتایج آزمایش‌ها شد.

۴. با توجه به نتایج مقاومت الکتریکی تمامی نمونه‌ها در برابر خوردگی و نفوذ یون کلرید مقاوم هستند. همچنین مقدار (۱۴۴/۶ kohm.cm) به‌عنوان بیشترین مقاومت الکتریکی ثبت شد.

۵. نتایج آزمایش التراسونیک نشان داد که سرعت عبور امواج با افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن کاهش می‌یابد.

۶. نتایج مدول الاستیسیته نشان داد که با افزایش درصد الیاف، مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد. مدول الاستیسیته دینامیکی و استاتیکی طرح شماره ۱ با نسبت سیلیکات به هیدروکسید ۱/۵

و الیاف با ۰/۱ درصد حجمی، به ترتیب 33.172 GPa و 22.465 GPa را به عنوان بیشترین مدول الاستیسیته ثبت شد.

۷. استفاده حداقلی از الیاف پلی پروپیلن مقاومت ضربه ای تا ظهور اولین ترک و رسیدن به مقاومت نهایی را به طور قابل ملاحظه ای افزایش داد. حتی مقدار کم الیاف (۰/۱ درصد) نیز تأثیر چشمگیری در بهبود مقاومت ضربه ای داشت. در بهترین حالت، استفاده از ۰/۵ درصد الیاف منجر به افزایش ۵۷ درصدی مقاومت ضربه‌ای شد.

۸. نتایج آزمایش جذب آب نشان داد که تمامی طرح‌ها درصد جذب آب پایین و دوام قابل قبولی دارند.

۹. نتایج آزمایش جرم حجمی نشان میدهد تمامی نتایج مقدار قابل قبولی دارند.

واژه نامه

سیلیکات سدیم	Na_2SiO_3
اشباع با سطح خشک	Ssd
انجمن آمریکایی آزمایش و مواد	ASTM
موسسه بتن آمریکا	ACI
گیگاپاسکال	GPa
مگاپاسکال	MPa
کیلواهم- سانتی‌متر	kohm.cm

سپاسگزاری

مراجع

[1] L. Vickers, A. Van Riessen, and W. D. Rickard, *Fire-resistant geopolymers: role of fibres and fillers to enhance thermal properties*. Singapore: Springer, 2015.

[2] D. S. Vijayan, S. Arvindan, and T. S. Janarthanan, "Evaluation of ferrock: A greener substitute to cement," *Materials Today: Proceedings*, vol. 22, pp. 781–787, 2020. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.147

[3] V. Jose and R. Vasudev, "Ferrock: Carbon negative substitute for cement—A review," *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*, 2023. https://doi.org/10.7770/safer-V12N-art784

[4] K. A. V. I. T. A. Singh, "Compressive strength study of green concrete by using ferrock," *Multidisciplinary International Research Journal, Gujarat Technological University*, vol. 2, pp. 63–80, 2020.

[5] A. L. Garcia, A. T. Achaiah, J. Bello, and T. Donovan, "Ferrock: A life cycle comparison to ordinary Portland cement," Industrial Ecology, Denver, CO, USA, 2017.

[6] M. R. Latifi, Ö. Biricik, and A. M. Aghabaglou, “Effect of the addition of polypropylene fiber on concrete properties,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 36, no. 4, pp. 345–369, 2022. https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1922221

[7] S. H. G. Mousavinejad, A. Darvishalinezhad, and M. S. BazKiagourabi, “Effect of polypropylene fibers versus macrobarchip on the characteristics of plastic concrete,” *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, vol. 37, no. 2, pp. 99–122, 2024. https://doi.org/10.22067/jfcei.2024.80952.1215

[8] T. C. Madhavi, L. S. Raju, and D. Mathur, “Polypropylene fiber reinforced concrete-a review,” *International journal of emerging technology and advanced engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 114–118, 2014.

[9] Y. Liu, L. Wang, K. Cao, and L. Sun, “Review on the durability of polypropylene fibre-reinforced concrete,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, pp. 1–13, 2021. https://doi.org/10.1155/2021/6652077

[10] S. Elkatatny, R. Gajbhiye, A. Ahmed, and A. A. Mahmoud, “Enhancing the cement quality using polypropylene fiber,” *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, vol. 10, pp. 1097–1107, 2020.

https://doi.org/10.1007/s13202-019-00804-4

[11] M. R. Mehr and H. Bakhshi, “Effect of steel fibers and concrete strength on mechanical specifications of steel fiber reinforced concrete,” *Concrete Research*, vol. 8, no. 1, pp. 101–112, 2015.

[12] ASTM C778, *Standard Specification for Standard Sand*, ASTM International, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1520/C0778-21.

[13] ASTM C109, *Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, ASTM International, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1520/c0109_c0109m-20.

[14] ASTM C348-08, *Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*, ASTM International, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1520/c0348-08.

[15] ASTM C1202-10, *Standard test method for electrical indication of concrete’s ability to resist chloride ion penetration*, ASTM International, 2012. [Online]. Available: https://doi.org/10.1520/C1202-10.

[16] ASTM C597-22, *Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*, ASTM International, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1520/c0597-22.

[17] M. M. Rahman, M. Usman, and A. A. Al-Ghalib, "Fundamental properties of rubber modified self-compacting concrete (RMSCC)," *Construction and Building Materials*, vol. 36, pp. 630–637, 2012. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.116

[18] ACI Committee 544.2R, *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*, Detroit, MI, USA: American Concrete Institute, 1989.

[19] ASTM C948, *Standard test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of Glass-Fiber reinforced concrete*, ASTM International, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1520/C0948-81R23.

[20] A. Shivani, N. Nihana, A. Gowri, H. Jalal, R. Arjun, and M. Jinudarsh, "Experimental investigation of ferrock by complete and partial replacement of cement in concrete," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 9, pp. 855–862, 2022.

[21] AASHTO-TP-95-14, *Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, American Association of State and Highway Transportation Officials, 2014.

[22] E. A. Whitehurst, "Soniscope tests concrete structures," *Journal Proceedings*, vol. 47, no. 2, pp. 433–444, 1951.

[23] M. L. Wilson and P. D. Tennis, *Design and control of concrete mixtures*. Portland, OR, USA: Portland Cement Association, 2021.